

燕麦植株生长及叶片生理活性对土壤镉胁迫的响应

马凤仪¹, 赵宝平^{1*}, 张 茹¹, 王永宁², 郭晓宇², 王美玲³, 刘景辉¹

(1 内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010010; 2 内蒙古农牧业生态与资源保护中心, 呼和浩特 010000; 3 乌兰察布市污染防治智能监管服务与技术支持中心, 内蒙古乌兰察布 012000)

摘 要: 该研究以燕麦品种‘燕科2号’(籽粒镉积累量高, Yh)和‘200919-7-1’(籽粒镉积累量低, Yl)为材料, 采用盆栽试验, 在土壤 Cd 胁迫条件下测定两种类型燕麦植株生长、叶片光合生理参数及抗氧化酶活性的变化, 探讨两品种对 Cd 胁迫的响应差异。结果表明: (1) Cd 胁迫条件下, 燕麦品种 Yh 和 Yl 植株生长、气体交换参数及叶绿素荧光参数均受到抑制, 并以单株干重、叶片净光合速率(P_n)、光化学淬灭系数(qP)表现最为突出, Yh 的降幅分别为 38.2%、35.0%、14.7%, Yl 降幅分别为 40.8%、57.1%、27.3%。(2) 镉胁迫均诱导增强了两个类型燕麦品种叶片抗氧化酶活性, 尤其是 SOD 活性得到显著增强, Yh 和 Yl 的增幅分别为 41.9% 和 44.9%; Cd 胁迫也显著提高了 MDA 含量, Yh 和 Yl 的增幅分别达到 22.2% 和 18.1%。研究发现, 在 Cd 胁迫条件下, 与低 Cd 积累燕麦品种相比, 高 Cd 积累燕麦品种具有较高的生物量和抗氧化酶活性, 以及较强的净光合速率和优异的叶绿素荧光特性, 从而表现出较强的耐 Cd 性。

关键词: 燕麦; 镉胁迫; 高和低镉积累; 生长; 生理特征

中图分类号: Q945.3; Q945.78 **文献标志码:** A

Response of Oat Plant Growth and Leaf Physiological Activity to Soil Cadmium Stress

MA Fengyi¹, ZHAO Baoping^{1*}, ZHANG Ru¹, WANG Yongning²,
GUO Xiaoyu², WANG Meiling³, LIU Jinghui¹

(1 College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2 Inner Mongolia Agriculture and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection Center, Hohhot 010000, China; 3 Ulanqab City Pollution Prevention Intelligent Supervision Service and Technical Support Center, Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China)

Abstract: In this study, oat cultivars ‘Yanke 2’ (high grain cadmium accumulation, Yh) and ‘200919-7-1’ (low grain cadmium accumulation, Yl) were used as materials, and pot experiments were carried out under the condition of soil Cd stress. The changes of plant growth, leaf photosynthetic physiology and antioxidant enzyme activities of the two types of oats were measured, and the differences in the responses of the two cultivars to Cd stress were discussed. The results showed that: (1) under Cd stress, the plant growth, gas exchange parameters and chlorophyll fluorescence parameters of high Cd accumulating oat cultivar (Yh) and low Cd accumulating oat cultivar (Yl) were inhibited, and the dry weight per plant, P_n and qP were the most prominent.

收稿日期: 2022-01-14; 修改稿收到日期: 2022-06-10

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助(CARS-07); 内蒙古科技成果转化项目(2020CG0032)

作者简介: 马凤仪(1998-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤与产地环境污染管控与修复工作。E-mail: mfy130227@163.com

* 通信作者: 赵宝平, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤与产地环境污染管控与修复工作。E-mail: zhaobaoping82@163.com

The decrease rates of Yh and Yl were 38.2% and 40.8%, 35.0% and 57.1%, 14.7% and 27.3%, respectively. (2) Cd stress induced the activities of antioxidant enzymes in leaves of the two types of oat cultivars, especially SOD activity was significantly enhanced, Yh and Yl increased by 41.9% and 44.9%, respectively; at the same time, Cd stress significantly increased MDA content, Yh and Yl increased by 22.2% and 18.1%, respectively. The study found that under Cd stress conditions, compared with the low Cd accumulation varieties, the high Cd accumulation varieties had higher biomass and antioxidant enzyme activities, as well as stronger net photosynthetic rate and excellent chlorophyll fluorescence characteristics, showing a relatively high level of chlorophyll fluorescence and strong Cd resistance.

Key words: oat; cadmium stress; high and low cadmium accumulation; growth; physiological characteristics

燕麦(*Avena sativa* L.)是中国重要的粮、饲作物,内蒙古是燕麦种植的最适地区之一^[1],占中国燕麦种植面积42%以上。内蒙古西部有色金属、黑色金属等矿产具有明显优势,但在开采、冶炼过程中一些重金属污染物通过沉降、雨水和淋溶等途径进入土壤,造成周边农田土壤镉(Cd)、铅(Pb)等重金属污染物超标,严重影响当地农产品的质量安^[2]。

Cd是植物非必需元素,具有强生物毒性和快速迁移的特点,能够导致植物营养缺陷、叶绿素合成抑制、光合作用降低、氧化应激等,最终抑制植物生长,甚至导致植物死亡^[3]。研究表明,Cd胁迫能降低植物蒸腾速率,导致气孔关闭,抑制“钙信号”传递^[4],影响光合速率^[5],抑制植物叶片中叶绿素的生物合成,减少叶绿体数量,使基粒类囊体排列紊乱,影响植物的原初光化学反应和光系统II(PSII),从而引起植物体内生理代谢紊乱,最终影响植物的生长发育^[6-7]。

同种作物不同品种对Cd胁迫生理响应存在差异,在小麦^[8-9]、玉米^[10]、水稻^[11]、龙葵^[12]等作物上已有相关报道,目前有关燕麦不同品种对Cd胁迫响应差异研究较少。因此,本试验以两个高、低Cd积累燕麦品种为材料,探明不同Cd积累型燕麦生长及叶片生理特性对Cd胁迫响应的差异,为燕麦抗Cd机制及应用农艺措施降低燕麦Cd积累量与超标风险,推动内蒙古燕麦安全、优质生产提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验依据前期18个燕麦品种两年大田筛选后结果,选择‘200919-7-1’(Yl)和‘燕科2号’(Yh)两个燕麦品种为供试材料。其中,‘200919-7-1’具有籽粒低Cd积累特性,在两年试验中籽粒平均Cd含量为0.122 mg/kg,种子由河北省张家口市农业科学院提供;‘燕科2号’具有籽粒高Cd积累特性,在两年试验中籽粒平均Cd含量为0.298 mg/kg,种子由内蒙古自治区农牧业科学院提供。

1.2 试验设计

试验在内蒙古农业大学燕麦产业研究中心温室进行。盆栽土壤取自河套灌区试验地(镉污染土壤,Cd)和内蒙古农业大学教学农场(对照,CK)。供试土壤Cd含量分别为0.96 mg/kg(Cd)和0.23 mg/kg(CK),供试土壤属轻度Cd污染土壤,基本理化性质详见表1。选择规格为240 mm×180 mm的塑料花盆,每盆装土5 kg,每盆播种30粒,每盆混为一个样,每个处理重复4次,共16盆,每盆施底肥磷酸二铵3 g。抽穗期测定相关生长及生理指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标 于抽穗期每处理选择5株先测定株高,然后将其用去离子水洗净,85℃下杀青30 min,于105℃烘至恒重后称重,得到整株生物量干重(DW)。

表1 盆栽试验供试土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of the pot experiment tested soil

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus /%	全钾 Total potassium /(g/kg)	有机质 Organic matter /(g/kg)	有效磷 Available phosphorus /(mg/kg)	速效钾 Quick-acting potassium /(mg/kg)	碱解氮 Alkaline hydrolysis of nitrogen /(mg/kg)	pH值 pH value	阳离子交换量 Cation exchange capacity /(cmol ⁺ /kg)
Cd	0.098	0.100	8.33	17.4	36.0	226	123	7.67	14.4
CK	0.066	0.079	8.28	13.4	27.6	227	108	8.11	13.2

表 2 Cd 胁迫下两个类型燕麦株高及单株干重

Table 2 Plant height and plant dry weight of two types of oat varieties under Cd stress

品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height /cm	器官干重 Organ dry weight/g				单株干重 Dry weight per plant/g
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	颖壳 Glume	
200919-7-1 (YI)	Cd	64.6±1.103b	0.030±0.005c	0.356±0.008c	0.089±0.011d	0.059±0.004c	0.534±0.080d
	CK	90.3±1.65a	0.044±0.007b	0.577±0.014b	0.199±0.016b	0.080±0.008b	0.900±0.007b
燕科 2 号 Yanke 2(Yh)	Cd	66.4±1.02b	0.048±0.007b	0.493±0.009b	0.131±0.014c	0.076±0.007bc	0.748±0.039c
	CK	91.3±1.835a	0.064±0.004a	0.787±0.010a	0.309±0.014a	0.116±0.010a	1.276±0.049a

注:同列数据后不同字母表示不同品种之间存在显著差异($P < 0.05$);数据为平均值±标准误差

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different cadmium treatments ($P < 0.05$); Data are means ± standard error

1.3.2 叶片抗氧化酶活性和 MDA 含量 取燕麦中上部叶片,依据《植物生理学实验指导》^[13]方法测定叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量,每个处理重复 3 次。

1.3.3 叶片气体交换参数和叶绿素荧光参数 采用 CIRAS-3 光合仪测定旗叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s),以及光下最小荧光(F_o')、光下最大荧光(F_m)、光适应下最大可变荧光(F_v'),并计算 PS II 反应中心的激发能捕获效率(F_v'/F_m')、光化学淬灭系数(qP)、实际光化学效率(φ_{PSII})、电子传递速率(ETR),测量时将叶片夹于叶室中部,每个处理重复 3 次;采用 SPAD-502 型叶绿素仪测定旗叶的相对叶绿素含量(SPAD)值,每个处理重复 3 次。叶绿素荧光参数计算公式如下:

$$F_v'/F_m' = (F_m' - F_o')/F_m';$$

$$qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o');$$

$$\varphi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$$

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 对数据进行简单统计处理和绘图,采用 SPSS 22.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对两个类型燕麦品种植株生长的影响

表 2 显示,与 CK 相比,两个燕麦品种的株高、各器官(根、茎、叶、颖壳)干重、单株干重在 Cd 胁迫下均显著降低,YI 品种(籽粒低 Cd 积累)降幅分别为 28.5%、31.8%、38.3%、55.3%、26.4%、40.8%,Yh 品种(籽粒高 Cd 积累)降幅则分别为 27.3%、25.9%、37.3%、57.6%、34.6%、38.2% ($P < 0.05$)。在相同处理下,两品种的株高没有显著差异,单株干重则表现为 Yh 品种显著高于 YI 品种,在 CK 和 Cd

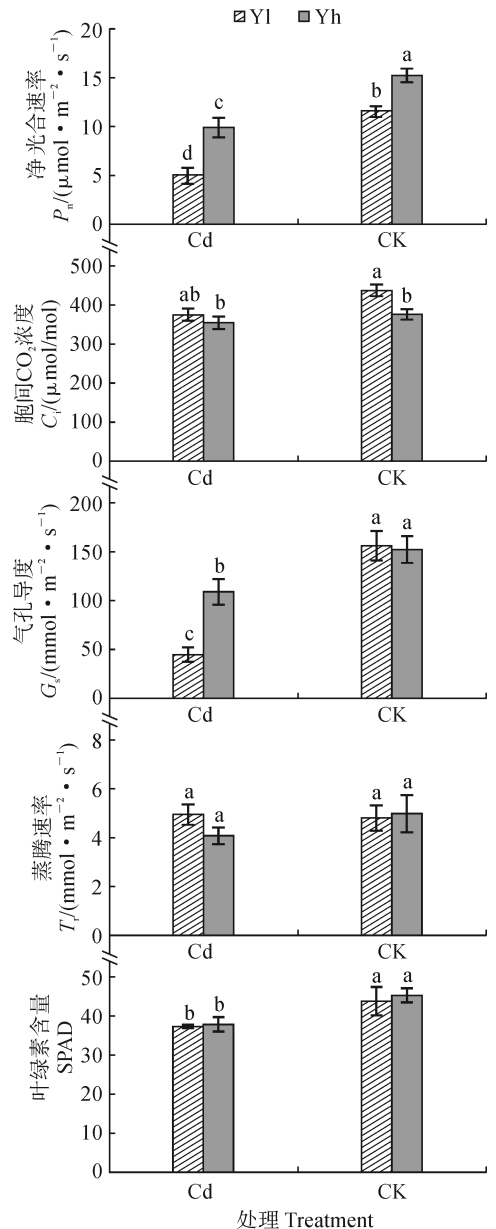


图 1 镉胁迫下两种类型燕麦品种叶片气体交换参数和叶绿素含量的变化

Fig. 1 Photosynthetic gas exchange parameters and SPAD in leaves of two types oats varieties under Cd stress

胁迫下分别显著提高 40.1% 和 47.8%。说明两类型燕麦品种的生长在镉胁迫下均受到显著抑制,但籽粒高 Cd 积累品种受到的抑制程度较小,尤其以单株干重的表现更为突出。

2.2 Cd 胁迫对两个类型燕麦品种叶片气体交换参数和叶绿素含量的影响

图 1 显示,两个燕麦品种叶片的 P_n 、 G_s 和 SPAD 在 Cd 胁迫条件下均比相应 CK 显著降低, Yh 的降幅分别为 35.0%、28.4% 和 16.4%, Yl 的降幅分别为 57.1%、71.3% 和 14.8% ($P < 0.05$), 其余指标则无显著变化; 同时, Yl 叶片的 C_i 也比 CK 显著降低 13.6%, 而 Yh 叶片的 C_i 以及两品种的 T_r 均无显著变化。在 CK 处理条件下, Yh 叶片的 P_n 较 Yl 显著提高 24.3%, 其 C_i 则比 Yl 显著降低 5.4%, 而其余指标与 Yl 均无显著差异; 在 Cd 胁迫条件下, Yh 的 P_n 和 G_s 较 Yl 分别显著升高 100% 和 143.6%, 而其 C_i 、 G_s 和 SPAD 与 Yl 均无显著差异。结果说明 Cd 胁迫显著抑制了两燕麦品种叶片的净光合速率、气孔导度和叶绿素含量, 但 Yl 品种受到的影响更大; Yh 品种的 P_n 在相同处理条件下均显著高于 Yl 品种。

2.3 Cd 胁迫对两种类型燕麦品种叶绿素荧光参数的影响

图 2 显示, 在 Cd 胁迫条件下, 燕麦品种 Yh 叶片的叶绿素荧光参数仅光下最小荧光 (F_0') 比 CK 显著提高 3.0%, 而燕麦品种 Yl 叶片的叶绿素荧光参数仅 F_0' 和光化学淬灭系数 (qP) 分别比对照显著降低 14.4% 和 27.3% ($P < 0.05$), 而其余参数原初光化学量子效率 (F_v'/F_m')、PS II 反应中心的激发能捕获效率 (F_v'/F_m')、实际光化学效率 (ϕ_{PSII}) 和电子传递速率 (ETR) 均与对照差异不显著。在 CK 处理下, Yh 品种的 F_0' 、 ϕ_{PSII} 、 qP 和 ETR 分别较 Yl 品种显著提高 6.6%、23.6%、30.1% 和 23.7%, 其 F_v'/F_m' 和 F_v'/F_m' 均与 Yl 品种无显著差异; 在 Cd 胁迫条件下, Yh 品种叶片的 F_0' 、 ϕ_{PSII} 、 qP 、ETR 较 Yl 品种分别显著提高 22.4%、29.2%、40.4% 和 29.2%, 而 Yl 品种的 F_v'/F_m' 却较 Yh 品种显著提高 15.0% ($P < 0.05$), 而两品种间的 F_v'/F_m' 无显著差异。可见, 在镉胁迫条件下, 两燕麦品种的叶绿素荧光参数与对照相比大多无显著变化, 而除 F_v'/F_m' 外, 其余参数在品种间均存在显著差异。

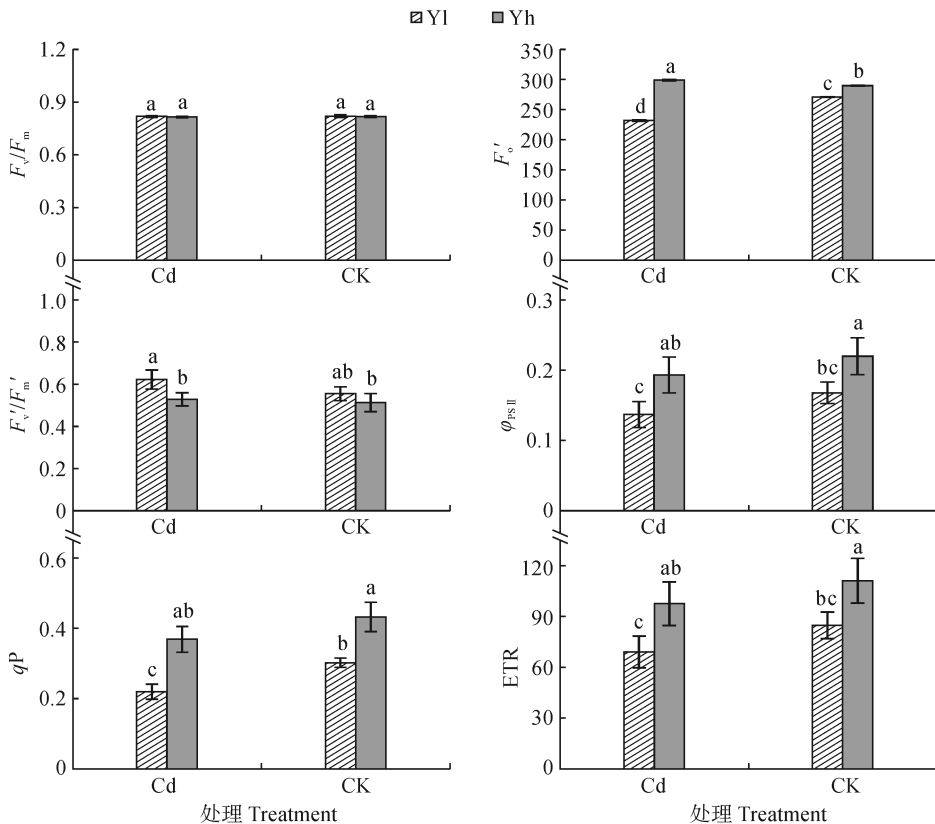


图 2 镉胁迫条件下两种类型燕麦品种叶片叶绿素荧光参数的变化

Fig. 2 Chlorophyll fluorescence characteristics of two types of oat varieties under Cd stress

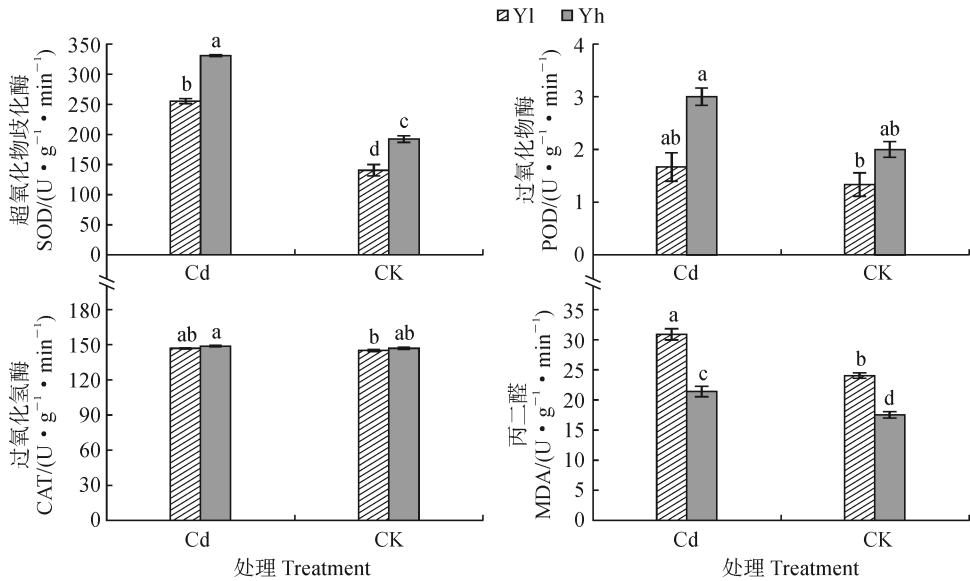


图3 镉胁迫条件下两种类型燕麦品种抗氧化酶活性及丙二醛含量的变化

Fig. 3 Antioxidant enzyme activities and malondialdehyde content in leaves of two types of oat varieties under Cd stress

表3 燕麦幼苗生长指标与生理指标之间的相关性

Table 3 Correlation between growth indexes and physiological indexes of oat seedling

项目 Item	株高 Plant height	根干重 Root dry weight	茎干重 Stem dry weight	叶干重 Leaf dry weight	颖壳干重 Glume dry weight	单株干重 Dry weight per plant
P_n	0.852	0.955*	0.979*	0.948*	0.947	0.972*
G_s	0.879	0.781	0.852	0.822	0.761	0.837
C_i	0.606	-0.112	-0.152	0.216	0.000	0.149
T_r	0.493	-0.019	0.249	0.380	0.244	0.278
SOD	-0.849	-0.204	-0.495	-0.584	-0.388	-0.504
POD	-0.468	0.287	-0.027	-0.151	0.058	-0.044
CAT	-0.744	-0.994**	-0.965*	-0.920	-0.963*	-0.958*
MDA	-0.617	-0.978*	-0.891	-0.820	-0.893	-0.878
F_v/F_m	0.639	-0.110	0.204	0.315	0.100	0.198
F_v'/F_m'	-0.558	-0.932	-0.824	-0.738	-0.814	-0.806
qP	0.537	0.977*	0.865	0.792	0.891	0.854
F_o'	0.353	0.816	0.649	0.539	0.641	0.626
ETR	0.545	0.981*	0.872	0.803	0.900	0.863
Φ_{PSII}	0.543	0.981*	0.871	0.801	0.899	0.862

注: * 表示 0.05 水平上的显著相关性, ** 表示 0.01 水平上的极显著相关性

Note: * means significant correlation at 0.05 level, ** means extremely significant correlation at 0.01 level

2.4 Cd 胁迫对两种类型燕麦品种叶片抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

由图3可知,两种类型燕麦品种叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)含量在Cd胁迫下均比CK不同程度提高,但仅SOD活性和MDA含量增幅达到显著水平;其中,Y1品种的增幅分别为

44.9%和22.2%,Yh品种增幅则分别为41.9%和18.1%($P < 0.05$)。在CK和Cd胁迫条件下,Yh品种的SOD活性较Y1分别显著提高36.8%和22.8%,而其MDA含量则较Y1显著降低27.1%和30.8%($P < 0.05$),POD和CAT活性在两品种间均差异不显著。可见,镉胁迫均能诱导两个类型燕麦品种叶片SOD活性和MDA含量显著提高,而

Yl 的 MDA 含量增幅高于 Yh, Yl 受到的 Cd 胁迫危害更大。

2.5 燕麦幼苗生长与生理指标之间关系

Cd 胁迫下, 燕麦通过不同机制共同作用来减轻 Cd 的毒害作用。相关性分析(表 3)结果显示, 燕麦根、茎、叶的干重和单株的干重与 P_n 呈显著正相关关系($P < 0.05$), 同时, 根的干重与 qP 、ETR 和 φ_{PSII} 也呈显著正相关关系; 根的干重与 MDA 呈显著负相关关系($P < 0.05$), 与 CAT 活性呈极显著负相关关系($P < 0.01$); 颖壳的干重与 CAT 活性呈显著负相关关系($P < 0.05$)。

3 讨论

本研究以高 Cd 积累燕麦品种‘燕科 2 号’(Yh) 和低 Cd 积累燕麦品种‘200919-7-1’(Yl) 为试验材料, 初步比较分析了 Cd 胁迫下两个品种的生长和生理差异。已有研究表明, Cd 胁迫条件下植物生长会受到抑制, 导致各器官生物量会降低^[14-15], 且相较于低 Cd 积累品种, 高 Cd 积累品种对 Cd 的耐受力较强, 生长受抑制的程度较小^[16]。在本研究中, 与 CK 处理相比, 高、低 Cd 积累燕麦品种株高及各器官生物量在 Cd 胁迫下均显著下降, 各器官生物量均与其叶片 P_n 呈正相关关系; Yh 品种的生物量在 Cd 胁迫下高于 Yl, 表明两品种的生长均受到镉胁迫的显著抑制, 但 Yh 对 Cd 胁迫有较强的耐受力。

同时, 植物的光合作用也会受到 Cd 胁迫的抑制, 导致光合作用降低的因子包括气孔限制和非气孔限制, C_i 是评判的依据; 当 P_n 、 G_s 、 C_i 同时降低时, 表明光合作用是受气孔限制因素的影响; 当 P_n 的降低伴随着 C_i 的升高, 则表明光合作用是受非气孔因素限制^[17-18]。周姣等^[12]研究表明龙葵和少花龙葵光合作用的降低是气孔限制和非气孔限制综合作用的结果; 董袁媛等^[19]研究表明镉胁迫下气孔限制降低了黄麻的光合作用。此外, 郭佳佳等^[16]报道, 低 Cd 积累小麦品种光合作用的降低部分原因是气孔限制因素引起的, 另有原因可能是由叶绿素含量及相关酶活性等非气孔限制因素引起的。本研究结果表明, 在 Cd 胁迫条件下, 燕麦品种 Yl 和 Yh 叶片的 P_n 、 G_s 和 C_i 较 CK 处理均同时呈下降趋势, 表明 Cd 胁迫下两个品种光合作用的降低可能是受气孔限制因素的影响; 此外, 燕麦品种根、茎、叶的干重和单株的干重均与 P_n 呈显著正相关, 而与 CAT 活性呈显著负相关, 表明 Cd 胁迫下光合作用

的降低可能与有关抗氧化酶活性等非气孔限制因素密切相关。

此外, 叶绿素荧光参数是评价植物生理指标变化和光能利用的一种较好检测方法^[20-21]。 F_v' 与光合作用的光反应无关, 与叶绿素浓度有关, 其变化可以说明 PS II 反应中心受到了逆境胁迫的抑制或者伤害^[22]; F_v'/F_m' 反映在逆境胁迫下植物光合机构的损伤程度, 通常用来判断植物是否受到光抑制影响^[23]; qP 用来表达 PS II 反应中心能量被色素所吸收之后的转化率, 也可以表示 PS II 开放中心的数目, 其值越高说明光系统 II 具有的电子传递活性越高, 电子传递速率越快, 相反 qP 值越低表明光系统 II 开放比例减小, 为光合作用提供的能量也降低^[24-25]; ETR 反映在实际光照强度下的表观电子传递速率^[26]。在本试验的 Cd 胁迫条件下, 燕麦品种 Yh 叶片的 F_v' 值增加幅度较 Yl 高, 说明 Cd 胁迫对品种 Yh 的叶绿素浓度影响较大; 品种 Yl 的 F_v'/F_m' 值提升幅度显著高于 Yh, 且 Yl 的 qP 降幅较 Yh 高, 这与 Cd 胁迫下 POD、CAT 活性有关, 说明燕麦品种 Yl 叶片光合机构损伤程度较 Yh 更严重, 对光合作用的影响更大。

另外, MDA 是细胞膜质过氧化产物, 它的积累可作为植物叶片的细胞膜遭受破坏程度的指标^[27], SOD、POD 和 CAT 共同组成植物体内的活性氧清除系统, 有效清除植物体内的自由基和过氧化物^[16], Cd 胁迫下 POD 和 CAT 活性的增加与活性氧的加速产生有关^[28]。本研究结果表明, 在 Cd 胁迫条件下, 两个燕麦品种 CAT 活性增加, 燕麦品种 Yl 的 MDA 含量增加幅度高于 Yh, 且品种 Yl 叶片的 SOD 活性和 MDA 含量均显著高于品种 Yh, 说明相比于品种 Yh, 品种 Yl 受 Cd 胁迫诱导的过氧化伤害较大。品种 Yl 叶片的 MDA 含量较 Yh 高可能是因为 Yl 的 POD 活性较低所致。孙亚莉等^[11]研究表明, 2 个水稻品种随着 Cd 浓度增加, 其 MDA 含量以及 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性均随着镉胁迫处理浓度的升高而增强, 且 Cd 胁迫处理下耐 Cd 品种 MDA 含量与各抗氧化酶活性较对照的相对增加值小于镉敏感品种; 邵国胜等^[29]研究表明, Cd 耐受性强的水稻抗氧化酶活性显著高于 Cd 敏感品种, 而 MDA 含量则低于 Cd 敏感品种。本研究中燕麦品种 Yl 叶片的 SOD、POD 活性均低于品种 Yh, 而 MDA 含量均显著高于品种 Yh, 这些结果表明 Yl 对 Cd 较敏感, 而 Yh 对 Cd 的耐受性较高。

4 结 论

Cd 胁迫显著抑制了高、低 Cd 积累燕麦品种生长和叶片光合气体交换参数及叶绿素荧光参数特性,诱导增强了两个品种的叶片 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性,尤其是 SOD 活性得到显著增强;与低 Cd 积累燕麦品种(200919-7-1)相比,高 Cd 积

累燕麦品种(‘燕科 2 号’)具有更高的生物量和抗氧化酶活性,光合气体交换参数和叶绿素荧光参数的表现也更优。综合研究结果发现,高 Cd 积累燕麦品种(‘燕科 2 号’)因具有优良的抗氧化和光合生理活性,从而对土壤 Cd 的耐受性较低 Cd 积累燕麦品种更强。

参考文献:

- [1] 薄晓智,石晓宇,赵炯超,等. 基于 MaxEnt 模型的中国裸燕麦种植气候适宜性评价[J]. 中国农业大学学报, 2021, **26**(9): 1-10.
BO X Z, SHI X Y, ZHAO J C, *et al.* Climatic suitability of naked oat (*Avena nuda* L.) planting in China based on Max-Ent model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, **26**(9): 1-10.
- [2] 欧阳燕莎,刘爱玉,李瑞莲. 镉对作物的影响及作物对镉毒害响应研究进展[J]. 作物研究, 2016, **30**(1): 105-110.
OUYANG Y S, LIU A Y, LI R L. Research progress on effects of cadmium on crops and the response of crops to cadmium[J]. *Crop Research*, 2016, **30**(1): 105-110.
- [3] LIU S L, YANG R J, TRIPATHI D K, *et al.* Retraction notice to “The interplay between reactive oxygen and nitrogen species contributes in the regulatory mechanism of the nitro-oxidative stress induced by cadmium in *Arabidopsis*” [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 1 007-1 024.
- [4] WILKINS K A, MATTHUS E, SWARBRECK S M, *et al.* Calcium-mediated abiotic stress signaling in roots[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1 296.
- [5] 铁得祥,胡红玲,喻秀艳,等. 桢楠幼树光合特性对镉胁迫的响应[J]. 生态学报, 2020, **40**(11): 3 738-3 746.
TIE D X, HU H L, YU X Y, *et al.* Responses of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Phoebe zhennan* saplings to cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(11): 3 738-3 746.
- [6] 张帆,万雪琴,翟晶. 镉处理下增施氮对杨树叶绿素合成和叶绿体超微结构的影响[J]. 核农学报, 2014, **28**(3): 485-491.
ZHANG F, WAN X Q, ZHAI J. Effects of nitrogen supplement on chlorophyll synthesis and chloroplast ultrastructure of poplar plants under cadmium stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, **28**(3): 485-491.
- [7] 罗巧,邹梦啼,龙月,等. 圆叶锦葵对 Cd 处理的光合生理响应及 Cd 富集特征[J]. 核农学报, 2019, **33**(7): 1 415-1 422.
LUO Q, WU M X, LONG Y, *et al.* Changes in photosynthe-
- sis and Cd accumulation characteristic of *Malva pusilla* Smith under different concentrations of Cd[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, **33**(7): 1 415-1 422.
- [8] 张大众,杨海川,菅明阳,等. Cd 胁迫下小麦的形态生理响应及 Cd 积累分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(9): 2 031-2 040.
ZHANG D Z, YANG H C, JIAN M Y, *et al.* Physiological response and Cd accumulation and distribution characteristics of wheat under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(9): 2 031-2 040.
- [9] 张欣,王英杰,豆昕桐,等. Cd 胁迫对 2 个耐 Cd 能力不同的小麦品种幼苗生长和生理特征的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, **40**(6): 30-36.
ZHANG X, WANG Y J, DOU X T, *et al.* Effect of Cd stress on the growth and physiological characteristics of the seedlings of two wheat cultivars with different Cd tolerance[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, **40**(6): 30-36.
- [10] 曹樱迪. 镉对玉米富友 9 和沈玉 33 萌发期生理代谢特征的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [11] 孙亚莉,刘红梅,徐庆国. 镉胁迫对不同水稻品种苗期光合特性与生理生化特性的影响[J]. 华北农学报, 2017, **32**(4): 176-181.
SUN Y L, LIU H M, XU Q G. Effect of cadmium stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits during seedling stage of different rice cultivars[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, **32**(4): 176-181.
- [12] 周蛟,韩盼盼,潘远智,等. Cd 胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(1): 26-34.
ZHOU J, HAN P P, PAN Y Z, *et al.* Effects of cadmium stress on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence in *Solanum nigrum* and *Solanum americanum* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(1): 26-34.
- [13] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 孟桂元,唐婷,周静,等. 不同玉米品种种子萌发期耐镉性分析[J]. 分子植物育种, 2016, **14**(11): 3 166-3 171.

- MENG G Y, TANG T, ZHOU J, *et al.* Analysis on cadmium tolerance of different maize varieties during seed germination stage[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2016, **14**(11): 3 166-3 171.
- [15] RIZWAN M, ALI S, ABBAS T, *et al.* Cadmium minimization in wheat: A critical review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130: 43-53.
- [16] 郭佳佳. 镉胁迫对两个品种冬小麦生理特性和产量的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2019.
- [17] 贾茵, 刘才磊, 兰晓悦, 等. 镉胁迫对小报春幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(3): 454-462.
- JIA Y, LIU C L, LAN X Y, *et al.* Effect of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Primula forbesii* seedlings [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(3): 454-462.
- [18] 高会玲, 刘金隆, 郑青松, 等. 外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应[J]. 生态学报, 2013, **33**(6): 1 935-1 943.
- GAO H L, LIU J L, ZHENG Q S, *et al.* Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(6): 1 935-1 943.
- [19] 董袁媛, 孙竹, 杨洋, 等. 镉胁迫对黄麻光合作用及镉积累的影响[J]. 核农学报, 2017, **31**(8): 1 640-1 646.
- DONG Y Y, SUN Z, YANG Y, *et al.* Effects of cadmium of photosynthesis and Cd accumulation of *Corchorus capsularis* L. [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, **31**(8): 1 640-1 646.
- [20] WILKINS K A, MATTHUS E, SWARBRECK S M, *et al.* Calcium-mediated abiotic stress signaling in roots[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, **7**: 1 296.
- [21] 崔倩, 夏江宝, 刘京涛, 等. 生物炭和EM菌对黄河三角洲盐碱地田菁生长和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(9): 3 101-3 110.
- CUI Q, XIA J B, LIU J T, *et al.* Effects of biochar and EM application on growth and photosynthetic characteristics of *Sesbania cannabina* in saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(9): 3 101-3 110.
- [22] 宋丰萍, 蒙祖庆. 干旱胁迫下作物光合参数研究进展[J]. 高原农业, 2018, **2**(2): 138-144.
- SONG F P, MENG Z Q. Research progress on photosynthetic parameters of crops in drought stress[J]. *Journal of Plateau Agriculture*, 2018, **2**(2): 138-144.
- [23] 何季. 荒漠植物白刺对模拟增雨的生理生态响应及适应策略[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2015.
- [24] 罗永忠, 成自勇. 水分胁迫对紫花苜蓿叶水势、蒸腾速率和气孔导度的影响[J]. 草地学报, 2011, **19**(2): 215-221.
- LUO Y Z, CHENG Z Y. Impact of water stress on leaf water potential, transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) of alfalfa[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, **19**(2): 215-221.
- [25] 王文森. 基于叶绿素荧光动力学的大豆干旱/NaCl胁迫影响分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2018.
- [26] 王一, 张霞, 杨文钰, 等. 不同生育时期遮阴对大豆叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(11): 2 072-2 081.
- WANG Y, ZHANG X, YANG W Y, *et al.* Effect of shading on soybean leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics at different growth stages[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(11): 2 072-2 081.
- [27] 李倩, 刘景辉, 武俊英, 等. 盐胁迫对燕麦质膜透性及 Na^+ 、 K^+ 吸收的影响[J]. 华北农学报, 2009, **24**(6): 88-92.
- LI Q, LIU J H, WU J Y, *et al.* Effect of salt stress on membrane permeability and Na^+ , K^+ absorption of oat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, **24**(6): 88-92.
- [28] CHEN A W, ZENG G M, CHEN G Q, *et al.* Plasma membrane behavior, oxidative damage, and defense mechanism in *Phanerochaete chrysosporium* under cadmium stress [J]. *Process Biochemistry*, 2014, **49**(4): 589-598.
- [29] 邵国胜, MUHAMMAD Jaffar Hassan, 章秀福, 等. 镉胁迫对不同水稻基因型植株生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, **18**(3): 239-244.
- SHAO G S, HASSAN M, ZHANG X F, *et al.* Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, **18**(3): 239-244.

(编辑:裴阿卫)